

# Zum Langzeitverhalten von Kontaktelementen aus CuCo2Be in Anlagen der Elektroenergietechnik

Blumenroth, F. (1); Löbl, H. (1); Großmann, S. (1); Kudoke, M. (2)

*Bei der Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie werden Schaltanlagen eingesetzt, in denen die stromführenden Leiter über verschiedene Kontaktelemente miteinander verbunden werden. Diese Verbindungen altern. Dadurch kann es zum Ausfall der Verbindung und damit zum Ausfall der Schaltanlage kommen. Das Langzeitverhalten der Verbindungen muss deshalb untersucht werden.*

**G**ekapselte gasisolierte Schaltanlagen (GIS) werden eingesetzt, um elektrische Energie verlustarm zu übertragen und zu verteilen (Bild 1). Aufgrund der hohen elektrischen Festigkeit des Isoliergases SF<sub>6</sub> sind diese Anlage außerdem sehr platzsparend. Zum Verbinden stromführender Leiter in gasisolierten Schaltanlagen werden bei der ABB Schweiz AG seit ca. 20 Jahren auch versilberte Schraubenfedern aus CuCo<sub>2</sub>Be als Kontaktelemente eingesetzt (Bild 2). Die Schraubenfeder ist dabei ein schräg gewickeltes Feder-element (Multifunktionsfeder), das die Kontaktkraft in der Verbindung erzeugt. Je größer die Kontaktkraft ist, desto geringer ist der Widerstand der Verbindung.

Während der Lebensdauer einer Schaltanlage von 30 bis 40 Jahren kann die Verbindung durch verschie-

dene Mechanismen altern: Spannungsrelaxation / Kriechen, Fretting, Elektromigration, Interdiffusion und Oxidation [1], [2], [3]. Altern bedeutet dabei, dass mit der Zeit der Verbindungswiderstand  $R_V$  größer wird. Durch den grö-

ßeren Widerstand wird die Verlustleistung  $P_V$  (Gl. (1)) abhängig vom Strom  $I$  und damit die Betriebstemperatur der Verbindung größer.

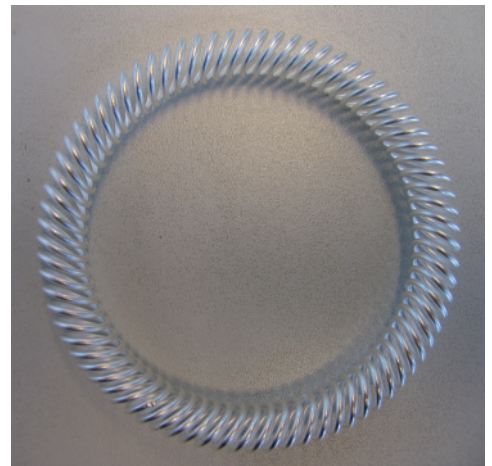
$$P_V = I^2 R_V \quad (1)$$

Eine hohe Betriebstemperatur ( $\vartheta_{\max} = 105 \text{ °C}$  - EN 60694: 1996) beschleunigt die Verformungsprozesse (Spannungsrelaxation) im Inneren der Werkstoffe. Durch erhöhte Spannungsrelaxation und die damit verbundenen Abnahme der Kontaktkraft in der Schraubenfeder kann sich der Verbindungswiderstand abhängig von der Temperatur und der Zeit erhöhen.

Um Aussagen zur Abnahme der Kontaktkraft abhängig von der Betriebszeit der Anlage machen zu können, wurde ein FE-Modell aufgebaut mit dem die Spannungsrelaxation in der Schraubenfeder berechnet werden kann.

## Steckverbindung mit Schraubenfeder

Eine Steckverbindung mit Schraubenfeder besteht aus einem Kontaktträger, dem Leiterrohr und der versilberten Schraubenfeder aus CuCo<sub>2</sub>Be (Bild 3). Die für einen niedrigen Verbindungswiderstand notwendige Kraft wird durch die schräg gewickelte Schraubenfeder erzeugt. Die Feder sitzt dabei in der Nut des Kontaktträ-



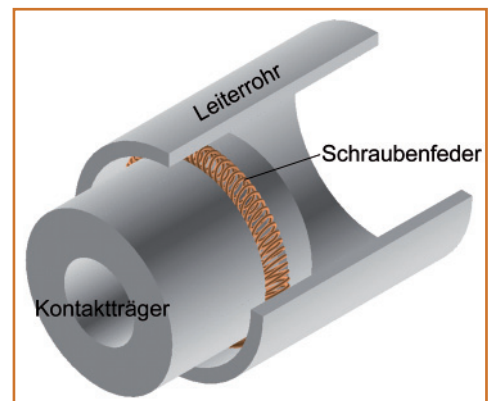
**Bild 2: Versilberte Schraubenfeder aus dem Material CuCo<sub>2</sub>Be**

gers. Da der Innendurchmesser des Leiterrohres geringer als der Außendurchmesser der Schraubenfeder ist, wird die Feder beim Aufschieben des Leiterrohres auf den Kontaktträger radial eingefedert.

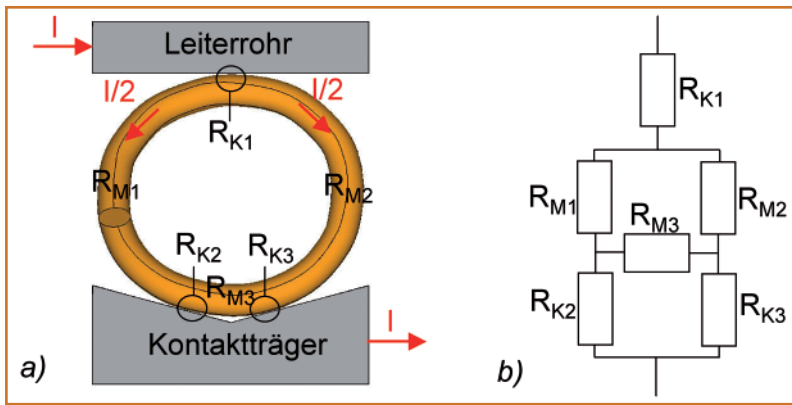
Der Widerstand  $R_V$  für diese Verbindung kann mit Hilfe eines Ausschnitts aus dieser Verbindung (Bild 4a) und einem dazu gehörigen Widerstands-Ersatzschaltbild (Bild 4b) beschrieben werden. Das Widerstands-Ersatzschaltbild zeigt, wie die von der Kraft abhängigen Kontaktwiderstände  $R_{K1}$  bis  $R_{K3}$  den Widerstand der Verbin-



**Bild 1: Gekapselte gasisolierte Schaltanlage bis 550 kV**



**Bild 3: Steckverbindung mit Schraubenfeder**



**Bild 4:** a) Längsschnitt der Steckverbindung mit Schraubenfeder (1 Windung),  
b) Widerstands-Ersatzschaltbild des Verbindungswiderstands  $R_V$

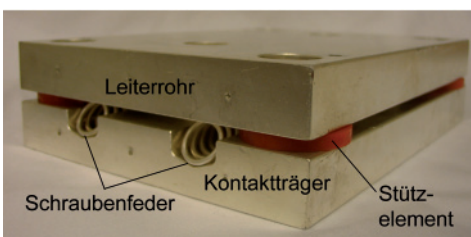
dung  $R_V$ , der von der Anzahl der Windungen  $W$  der Feder bestimmt wird, beeinflussen (Gl. (2)).

$$R_V = f(R_K(W, F_K)) + f(R_M(W)) \quad (2)$$

Der Materialwiderstand der Schraubenfeder  $R_M$  hängt nur von der Anzahl der Windungen  $W$  ab. Je mehr Windungen die Feder besitzt, desto geringer wird der Materialwiderstand. Dagegen hängen die Kontaktwiderstände  $R_K$  wesentlich von der Kontaktkraft  $F_K$  ab.

### Langzeitverhalten/Kontaktwiderstand – Kontaktkraft

Die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Verbindungswiderstand und Kontaktkraft und die Untersuchung des Einflusses der Spannungsrelaxation auf das Langzeitverhalten der Steckverbindung mit Schraubenfeder erfolgte an einer Modellanordnung (Bild 5), da eine direkte Messung der Kontaktkraft an der koaxialen Verbindung (Bild 3) nur



**Bild 5:** Modellanordnung für Steckverbindungen mit Schraubenfedern

mit sehr hohem Aufwand möglich gewesen wäre. Zur Messung der Kontaktkraft an der Modellanordnung wurde die Schraubenfeder halbiert. Die zwei Hälften der Feder wurden zwischen zwei versilberte, parallele Druckplatten gelegt. Die in die untere Druckplatte eingefräste Nut war der im originalen Kontaktträger äquivalent. Die konstante Einfederung  $s$ , die von der Geometrie der in Bild 3 gezeigten Steckverbindung abhängt, wurde über isolierende Stützelemente erreicht. Die Messung der Kontaktkraft pro Windung konnte nun im Modell vertikal erfolgen [4]. Durch Veränderung der Höhe der Stützelemente konnte die Federcharakteristik (Bild 6) für die CuCo2Be Schraubenfeder und der Zusammenhang zwischen Einfederung  $s$  und Verbindungswiderstand  $R_V$  (Bild 7) ermittelt werden.

### Spannungsrelaxation

Unter dem Begriff der Spannungsrelaxation wird der Abbau der inneren mechanischen Spannung eines anfänglich elastisch belasteten Werkstoffs abhängig von der Zeit und der Temperatur verstanden.

Die Spannungsrelaxation ist allgemein als das Verhältnis der mechanischen Spannung  $\sigma(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  bezogen auf die Ausgangsspannung  $\sigma(t=0)$  definiert (Gl. (3)) [5].

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma(t=0)} = \frac{F_K(t)}{F_K(t=0)} \quad (3)$$

Gl. (3) gilt äquivalent auch für die durch die Feder erzeugte Kontaktkraft  $F_K(t)$ , da Kraft und Spannung in einer festen Beziehung zueinander stehen. Der Abbau der Spannung  $\sigma(t)$  kann analytisch mit den Gl. (4) und (5) beschrieben werden.

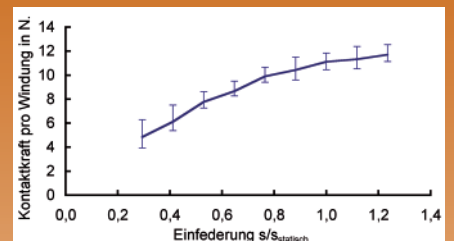
$$\sigma(t) = \sigma(t=0) - E \varepsilon_{cr}(t) \quad (4)$$

$$\sigma(t) = \sigma(t=0) - E \int \dot{\varepsilon}_{cr}(\sigma) dt \quad (5)$$

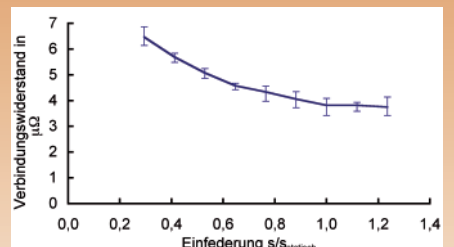
$E$  ist dabei der Elastizitätsmodul für CuCo2Be. Die stationäre Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon}_{CR}$ , die für die Berechnung des Kraftabbaus durch Spannungsrelaxation in der Feder über eine Zeit von 30 bis 40 Jahren entscheidend ist, wird mit der phänomenologischen Kriechgleichung für den stationären Bereich bestimmt [6], [7].

$$\dot{\varepsilon}_{cr}(\sigma, T) = C \sigma^n e^{-\frac{Q_C}{RT}} \quad (6)$$

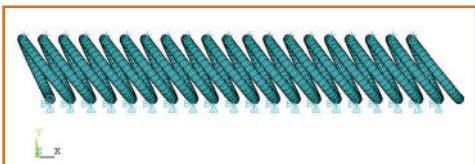
$Q_C$  ist die Aktivierungsenergie,  $T$  die Temperatur,  $n$  der Nortonexponent und  $R$  die universelle Gaskonstante (8,314 J/K·mol).  $C$  beschreibt als Proportionalitätsfaktor den Werkstoffzustand, der von der Bearbeitung des Materials (Verformung, Wärmebehandlung) abhängt.



**Bild 6:** Federcharakteristik gemessen an einer CuCo2Be Schraubenfeder



**Bild 7:** Verbindungswiderstand abhängig von Einfederung, gemessen an einer CuCo2Be Schraubenfeder

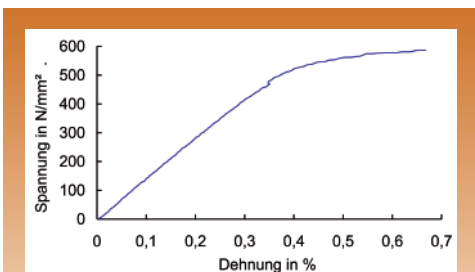


**Bild 8: FE - Modell der Schraubenfeder Modellanordnung**

Um den Abbau der Kontaktkraft  $F_K(t)$  berechnen zu können, wurde ein FE-Modell mit dem Programm ANSYS erstellt, das zum einen die geometrische Form und zum anderen die charakteristischen Werkstoffparameter der Schraubenfeder enthält (Bild 8). Die Werkstoffparameter, die das Materialverhalten der CuCo2Be Legierung beschreiben, ergeben sich aus der bilinearen Spannungs-Dehnungs-Kurve (Elastizitätsmodul  $E$ , Dehngrenze  $R_{p0,2}$  und Verfestigungskoeffizient  $E_T$ ). Des Weiteren werden die Kriechparameter ( $n$ ,  $Q_C$  und  $C$ ) in das Modell eingegeben, um die Spannungsrelaxation berechnen zu können.

**Ermittlung der Werkstoffparameter**

Die Werkstoffparameter, wie sie in DIN 17666 für CuCo2Be angegeben werden, sind nicht ausreichend, um ein genaues Modell für die Schraubenfeder im Ausgangszustand zu erstellen. Zum Verfestigungskoeffizienten  $E_T$  des Materials, der den plastischen Verformungsbereich beschreibt, werden in der Literatur keine Angaben gemacht. Deshalb wurden die Werte für  $E$ ,  $R_{p0,2}$  und  $E_T$  experimentell ermittelt. In einachsigen Zugversuchen wurden bei Raumtemperatur



**Bild 9: Spannungs - Dehnungs - Kurve bei  $\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$  [Firma Siempelkamp Dresden]**

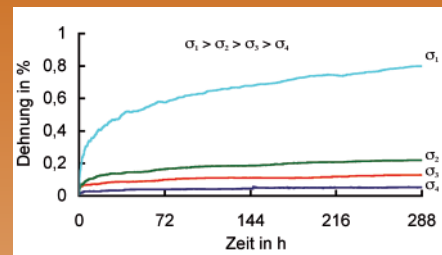
$\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$  (Bild 9) und bei der maximalen Betriebstemperatur  $\vartheta_{max} = 105 \text{ °C}$  der Verbindung an geraden Drahtproben die Spannungs - Dehnungs - Kurven ermittelt und die Werkstoffparameter bestimmt. Die geraden Drahtproben wurden vom Federnhersteller äquivalent der Schraubenfeder wärmebehandelt (gehärtet).

Bei Raumtemperatur  $\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$  wurde ein Elastizitätsmodul von  $E = 149.000 \text{ N/mm}^2$ , eine Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 580 \text{ N/mm}^2$  und ein Verfestigungskoeffizient von  $E_T = 11.200 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Bei der maximalen Betriebstemperatur der Verbindung  $\vartheta_{max} = 105 \text{ °C}$  betragen der Elastizitätsmodul  $E = 138.500 \text{ N/mm}^2$ , die Dehngrenze  $R_{p0,2} = 575 \text{ N/mm}^2$  und der Verfestigungskoeffizient  $E_T = 6.400 \text{ N/mm}^2$ . Die ermittelten Werkstoffparameter  $E$  und  $R_{p0,2}$  für  $\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$  liegen im Bereich, die in der Norm DIN 17666 angegeben werden.

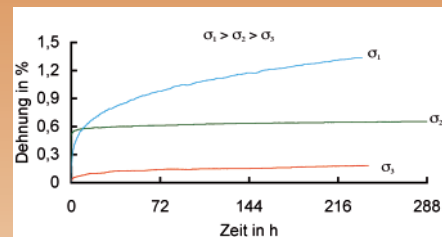
**Ermittlung der Kriechparameter**

Die stationären Kriechgeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon}_{CR}$ , die zur Bestimmung der Kriechparameter  $n$ ,  $Q_C$  und  $C$  notwendig sind, wurden ebenfalls in einachsigen Zug-Kriech-Versuchen an geraden Drahtproben bestimmt (Bilder 10 bis 12, Firma Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH). Der Norton-Exponent  $n$  kann mit Hilfe von Lastwechselversuchen (mechanische Spannung  $s$ ) und die Aktivierungsenergie  $Q_C$  mit Hilfe von Temperaturwechselversuchen (Temperatur  $T$ ) bestimmt werden [6]. Es wurde eine Versuchsmatrix mit verschieden hohen praxisrelevanten mechanischen Spannungen und Temperaturen aufgestellt.

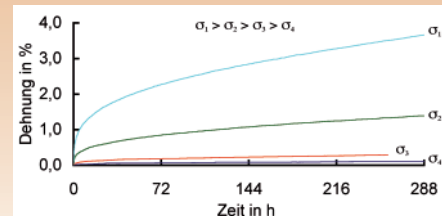
Die stationäre Kriechgeschwindigkeit wurde aus dem Anstieg der Kriechkurve bestimmt. Es wurden die Norton-Exponenten  $n$  und Aktivierungsenergien  $Q_C$  ermittelt (Bild 13 u. 14). Für die Aktivierungsenergien wurde ein Mittelwert von  $Q_C \approx 49 \text{ kJ/mol}$  bestimmt. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Wert von reinem Kupfer mit  $Q_C \approx 197 \text{ kJ/mol}$  [3]. Da es sich bei dem hier untersuchten



**Bild 10: Kriechkurven bei  $\vartheta = 105 \text{ °C}$**



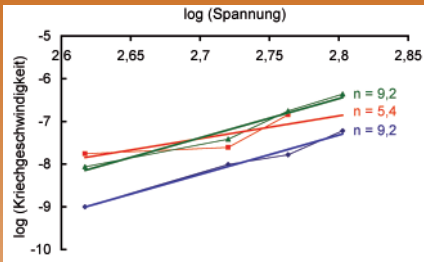
**Bild 11: Kriechkurven bei  $\vartheta = 130 \text{ °C}$**



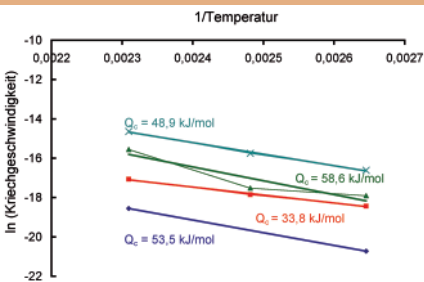
**Bild 12: Kriechkurven bei  $\vartheta = 160 \text{ °C}$**

Werkstoff CuCo2Be im Vergleich zu Kupfer um ein ausscheidungsgehärtetes Material mit einer wesentlich höheren mechanischen Festigkeit handelt, wurde eine höhere Aktivierungsenergie erwartet. Der hier ermittelte Wert von  $Q_C \approx 49 \text{ kJ/mol}$  ist nur damit zu erklären, dass diese Untersuchung bei hohen mechanischen Spannungen, im Bereich der Streckgrenze des Materials von  $R_{p0,2} = 580 \text{ N/mm}^2$ , durchgeführt wurden. Der in der Literatur angegebene Wert der Aktivierungsenergie für reines Kupfer wurde dagegen bei mechanischen Spannungen ermittelt, die maximal 70 % der Streckgrenze des Kupfers betragen. Der Mittelwert für den Norton-Exponenten mit  $n \approx 8$  liegt im erwarteten Bereich ( $5 < n < 40$ ) für mehrphasige Legierungen [6]. Eine weitere Möglichkeit  $Q_C$ ,  $n$  und vor allem auch den Proportionalitätsfaktor  $C$  zu ermitteln, ist die „Methode der kleinsten Quadrate“ (Gauß-





**Bild 13: Bestimmung des Norton – Exponenten n**



**Bild 14: Bestimmung der Aktivierungsenergie  $Q_C$**

scher Minimumbedingung). Zu den experimentell ermittelten stationären Kriechgeschwindigkeiten gibt es eine Näherungsgleichung (Gl. (6)) mit den drei unbekannt Parametern  $n$ ,  $Q_C$  und  $C$ . Diese Parameter werden so berechnet, dass die Summe der Quadrate  $Q$  der vertikalen Abweichung der Werte der stationären Kriechgeschwindigkeiten von den Funktionswerten der Näherungsfunktion ein Minimum ergibt (Gl. 7).

$$Q = \sum_{i=1}^{11} (\dot{\epsilon}_{cr\text{Versuch}} - \dot{\epsilon}_{cr\text{Rechnung}})^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

Mit dieser Methode wurden die Kriechparameter  $n = 8,3$ ,  $Q_C = 46,4 \text{ kJ/mol}$  und  $C = 5 \cdot 10^{-25} (\text{N/mm}^2)^{8,3}$  bestimmt. Berechnet man nach Gl. (6) mit den nach Gl. (7) ermittelten Kriechparametern die stationären Kriechgeschwindigkeiten abhängig von der mechanischen Spannung für die maximale Betriebstemperatur der Verbindung von  $\vartheta_{\max} = 105 \text{ °C}$  und vergleicht diese mit den experimentell ermittelten Kriechgeschwindigkeiten, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung bis zu einer Spannung von  $580 \text{ N/mm}^2$  (Bild 15).

Oberhalb der Streckgrenze  $R_{p0,2} = 580 \text{ N/mm}^2$  wurde das Mate-

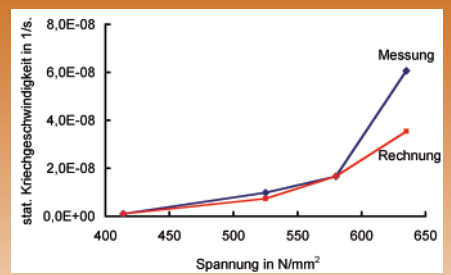
rial plastisch verformt. Die hohen mechanischen Spannungen bis  $\sigma_{\max} = 635 \text{ N/mm}^2$  in der Schraubenfeder werden aufgrund der konstanten Einfederung schnell abgebaut und liegen dann unterhalb der Streckgrenze. Für die Berechnung der Spannungsrelaxation im stationären Bereich beschreiben die nach Gl. (7) ermittelten Kriechparameter den Prozess mit einer guten Genauigkeit.

### Berechnung der Spannungsrelaxation

Zur Berechnung des Kraftabbaus in der Verbindung über eine Zeit von 30 bis 40 Jahren wurde zum einen ein FE-Modell der Schraubenfeder für die Modellanordnung (Bild 8) und zum anderen für die Originalanordnung (Bild 16) aufgebaut.

Der Kontaktträger und das Leiterrohr wurden bei der Berechnung des Kraftabbaus in der Verbindung als quasi starr betrachtet und deshalb nicht berücksichtigt. Zur Verifizierung der Modelle wurde die Federcharakteristik für die Modellanordnung berechnet und mit der experimentell ermittelten Charakteristik verglichen (Bild 17). Die berechnete Federcharakteristik für die Originalanordnung liegt deutlich unterhalb der Federcharakteristik für die Modellanordnung. Dieser Unterschied lässt sich durch die unterschiedliche Steilheit der Windung in der Originalanordnung verglichen mit der Modellanordnung erklären. Bei der Modellanordnung stehen durch das Aufbiegen der halbierten Schraubenfeder die Windungen steiler als bei der Originalanordnung. Die unterschiedlichen Kontaktkräfte zwischen der Modell- und der Originalanordnung konnten experimentell bestätigt werden.

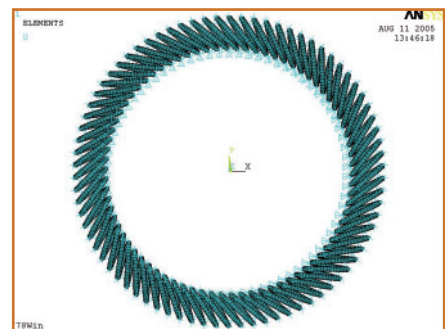
Die Berechnung des Kraftabbaus erfolgte mit den experimentell ermittelten Kriechparametern  $n = 8,3$ ,  $Q_C = 46,4 \text{ kJ/mol}$  und  $C = 5 \cdot 10^{-25} (\text{N/mm}^2)^{8,3}$  bei einer Temperatur von  $\vartheta_{\max} = 105 \text{ °C}$ . Um die Berechnung zu verifizieren, wurde der berechnete Kraftabbau mit dem gemessenen, ermittelt in einem Langzeitversuch verglichen. Im Langzeitversuch wurde an sechs Verbindungen, die im



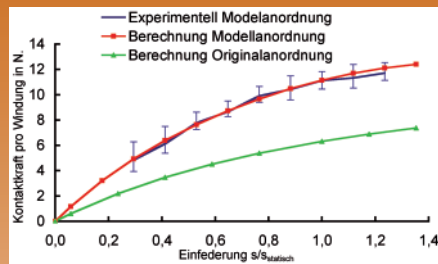
**Bild 15: Im Versuch und durch Rechnung ermittelte stationäre Kriechgeschwindigkeit bei  $\vartheta = 105 \text{ °C}$**

Wärmeschrank bei  $105 \text{ °C}$  gelagert waren und an sechs Verbindung, die bei  $105 \text{ °C}$  mit Strom belastet waren, der Kraftabbau gemessen. Das primäre Kriechen wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Deshalb wurde bei der Berechnung des Abbaus der Kontaktkraft durch das stationäre Kriechen von einer kleineren Kontaktkraft bei  $t = 0 \text{ h}$  ausgegangen. Diese Kraft wurde durch eine geringere Einfederung der Schraubenfeder realisiert.

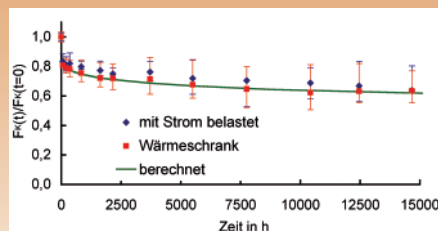
Der berechnete Kraftabbau an der Modellanordnung korreliert gut mit dem gemessenen (Bild 18), so dass mit den ermittelten und verifizierten Werkstoff- und Kriechparametern die Berechnung der Spannungsrelaxation an der Originalanordnung möglich wurde. Für die Modellanordnung ergibt sich aus der Berechnung nach 30 Betriebsjahren bei maximaler Betriebstemperatur von  $\vartheta_{\max} = 105 \text{ °C}$  eine Kontaktkraft von 46% der Ausgangskraft. Die Spannungsrelaxation in der Schraubenfeder der Modellanordnung macht deutlich, wie sich die mechanischen Spannungen in der Feder abbauen (Bild 19).



**Bild 16: FE – Modell der Schraubenfeder (Originalanordnung)**



**Bild 17: Verifizierung des ANSYS Modells anhand der Federcharakteristik**



**Bild 18: gemessener und berechneter Kraftabbau an der Modellanordnung**

### Langzeitverhalten des Verbindungswiderstandes

Um den Einfluss des Kraftabbaus in der Modellanordnung auf den Verbindungswiderstand untersuchen zu können, wurde der Verlauf des Verbindungswiderstandes bei Raumtemperatur  $\vartheta_0 \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$  gemessen (Bild 20). Um den Einfluss des Stromes auf die Alterung der Verbindung (Elektromigration) bestimmen zu können, wurden die Verbindungen unterschiedlich erwärmt (Wärmeschrank und mit Strom belastet).

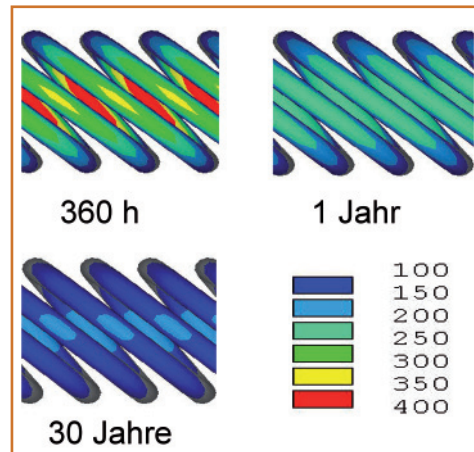
Obwohl sich die Kontaktkraft  $F_K(t)$  in den ersten 1.000 Stunden um ca. 20 bis 30 % und nach weiteren 14.000 Stunden um ca. 35 % gegenüber der Ausgangskontaktkraft  $F_K(t=0)$  verringert hat, bleibt der Verbindungswiderstand quasi konstant. Der konstante Verbindungswiderstand kann durch die plastische Verformung der Silberschicht in den wahren Kontaktflächen erklärt werden. Auch bei verringerter Kraft durch Spannungsrelaxation in der Feder bleibt die plastische Verformung in der wahren Kontaktfläche erhalten. Der Strom hat bis zu einer Zeit von 15.000 h keinen Einfluss auf das Langzeitverhalten der Modellverbindung.

### Zusammenfassung

- Elektrische Verbindungen altern durch verschiedene Mechanismen. Dadurch können die Verbindungen ausfallen. Das Langzeitverhalten muss deshalb untersucht werden.
- Für Steckverbindungen mit Schraubenfeder in gekapselten gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen wurde angenommen, dass die Spannungsrelaxation in der Feder ein entscheidender Alterungsmechanismus ist. Durch Spannungsrelaxation verringert sich die Kontaktkraft in der Verbindung. Da der Kontaktwiderstand von der Kraft abhängig ist, kann dieser abhängig von der thermischen Belastung und der Zeit größer werden.
- Zur Berechnung des Kraftabbaus in der Feder, basierend auf der phänomenologischen Kriechgleichung für den stationären Bereich, wurden die Kriechparameter Norton-Exponent, Aktivierungsenergie und Proportionalitätsfaktor bestimmt.
- Ein in ANSYS erstelltes FE-Modell der Schraubenfeder wurde experimentell an einer Modellanordnung verifiziert. Durch Spannungsrelaxation in der Feder beträgt die Kontaktkraft bei einer konstanten Temperatur von  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  nach 30 Jahren noch 46 % der Anfangskraft.
- Das Langzeitverhalten der Feder wurde bis 15.000 Stunden experimentell an Modellverbindungen untersucht. Obwohl sich die Kontaktkraft bezogen auf die Anfangskraft nach dieser Zeit um 35 % verringert hat, bleibt der Kontaktwiderstand quasi konstant.

### Literatur

[1] Li, G., Thomas, B. G., Stubbs J.F.: Modeling creep and fatigue of copper alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.31A, No. 10, pp. 2491-2502, 2000  
 [2] Keil, A., Merl, W., Vinaricky, E. (Editors): Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe, Berlin: Springer Verlag, 1984  
 [3] Slade, P.G. (Editor): Electrical Contacts,

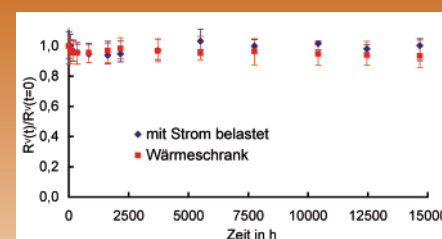


**Bild 19: Spannungsrelaxation an der Feder der Modellanordnung bei  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  – Vergleichsspannung von Mises**

New York, Basel, Marcel Dekker Inc., 1999

[4] Blumenroth, F, Löbl, H, Großmann S., Kudoke, M.: Long time behaviour of static high current plug-in connectors with CuCo2Be helical spring, 23th Conference on Electrical Contacts 2006, Sendai, pp. 251-256  
 [5] Gross, S.: Spannungsrelaxation von Kupferlegierungen, METALL 45, 1991, pp. 1108-1120  
 [6] Bürgle, R.: Handbuch Hochtemperaturwerkstofftechnik, Grundlagen, Werkstoffbeanspruchung, Hochtemperaturlegierungen, Verlag Vieweg Technik, 1998  
 [7] Schoft, S., Kindersberger, J., Löbl, H.: Reduction of Joint Force by Creep in High Current Joints, 21th Conference on Electrical Contacts 2002, Zürich, pp. 406-412

(1) Falk Blumenroth, Helmut Löbl, Steffen Großmann, Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
 (2) Matthias Kudoke, ABB Schweiz AG, Zürich, Gasolierte Schaltsysteme, Schweiz



**Bild 20: Verbindungswiderstand der Modellanordnung in Abhängigkeit von der Zeit**